NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. F. PERRIER.



PARIS,

GAUTHIER-VILLARS, IMPRIMEUR-LIBRAIRE

DU BUREAU DES LONGITUDES, DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE,

SUCCESSEUR DE MALLET-BACHELIER,

Quai des Augustins, 55.

1879

NOTICE

SUR LES

TRAVAUX SCIENTIFIQUES

DE

M. F. PERRIER.

RÉSUMÉ.

M. le commandant Perrier, ancien élève de l'École Polytechnique, membre du Bureau des Longitudes, vice-président de la Société de Géographie, un des membres français de l'Association géodésique internationale, est, depuis dix ans, le chef du Service géodésique au Ministère de la Guerre.

Il a attaché son nom aux travaux suivants :

1861 et 1862. — Jonction trigonométrique des côtes de France et d'Angleterre par-dessus le détroit du Pas-de-Calais.

1863. — Triangulation et nivellement de la Corse. Rattachement de cette île au continent.

1864-1879. — Triangulation de l'Algérie, comprenant la détermination géodésique et astronomique d'un arc de parallèle de 9°36′ d'amplitude. Grâce à l'emploi de l'électricité, cet arc peut servir à l'étude de la figure de la

Terre ; c'est la seule mesure de ce genre dont la Science puisse dès aujourd'hui tirer parti.

1870-1879. — Reprise de la grande méridienne de France.

L'opération est exécutée depuis Perpignan jusqu'à la base de Melun. L'œuvre immortelle de nos maîtres aura été ainsi mise en harmonie avec les besoins actuels de la Science.

1874-1879. — Stations astronomiques en Algérie et en France.

1879. — Jonction de l'Espagne avec l'Algérie par-dessus la Méditerranée, au moyen des plus grands triangles qui aient été mesurés. C'est la réalisation du vœu exprimé au commencement du siècle par Biot et Arago. Ce vœu même a été dépassé, car l'arc du méridien anglo-franco-hispano-algérien est ainsi poussé, non pas jusqu'à l'Atlas, mais jusqu'au Sahara, et dépasse en étendue les plus grands arcs mesurés jusqu'ici.

1879. — Détermination, au moyen de signaux lumineux électriques et rythmés, de la différence de longitude entre Tetica (Espagne) et M'Sabiha (Algérie) par-dessus la Méditerranée. Cette opération ferme le vaste polygone de longitudes Paris, Marseille, Alger, M'Sabiha, Tetica et Madrid ; c'est la première de ce genre qui ait été exécutée.

Renouvellement complet des instruments et des méthodes de la Géodésie au Dépôt de la Guerre. C'est à ces perfectionnements qu'est dû en grande partie le succès des opérations qui viennent d'être exécutées entre les deux continents : ces opérations eussent été impraticables pour les anciens géodésiens.

La plupart de ces travaux ont été successivement soumis au jugement de l'Académie et déjà publiés, ou sont en voie de publication dans les Tomes IX, X et XI du *Mémorial du Dépôt de la Guerre*.

On trouvera dans les pages suivantes les détails caractéristiques de ces diverses opérations.

I.

Jonction des triangulations de la France et de l'Angleterre par-dessus le pas de Calais.

(Mémorial du Dépôt de la Guerre, t. IX, Ier Supplément.)

Les géodésiens français et anglais avaient tenté, à plusieurs reprises, de relier entre elles les triangulations des deux pays par-dessus le pas de Calais; mais toutes ces tentatives étaient restées infructueuses, à cause de l'impossibilité d'apercevoir nettement les signaux ordinaires d'une rive du détroit à l'autre.

C'est en 1861 que l'opération fut tentée de nouveau, et cette fois avec succès, grâce à l'emploi des héliotropes, qui furent introduits alors, pour la première fois, dans la pratique de la Géodésie française.

Deux Commissions, composées l'une d'ingénieurs anglais, l'autre d'officiers français, furent chargées d'exécuter *simultanément*, mais *séparément*, ce travail important.

Je fus désigné comme collaborateur du colonel Levret, chef des opérations du côté de la France.

Le réseau maritime commun aux deux pays comprenait six stations, à chacune desquelles j'installai des miroirs du modèle Silbermann, réfléchissant la lumière du Soleil vers les stations voisines.

L'opération, souvent contrariée par les brumes du détroit, dura deux années; à la deuxième campagne, le colonel Levret, obligé de rentrer à Paris, me laissa le soin de faire les observations à trois des stations principales.

Le compte rendu de nos travaux a été publié dans le Ier Supplément au Tome IX du *Mémorial du Dépôt de la Guerre.*

La comparaison de nos résultats avec ceux des ingénieurs anglais, pour les longueurs des côtés, les positions géographiques et les azimuts, ne révéla que des différences légères, imputables à des erreurs admissibles dans l'observation, et nous pûmes nous tenir pour satisfaits d'un pareil accord, en considérant surtout combien notre outillage scientifique était inférieur à celui de nos voisins.

Comme conséquence immédiate, la méridienne de France était prolongée

de 13° vers le nord, à travers l'Angleterre et l'Écosse jusqu'aux îles Shetland, et embrassait ainsi entre ces îles et Formentera une amplitude de 22° 40′.

J'ajouterai que nous avions pu, pendant deux années, assister au fonctionnement du Service géodésique chez les Anglais, admirer leurs magnifiques cercles de Ramsden et les comparer avec nos cercles répétiteurs, étudier avec MM. James et Clarke, et pratiquer même leurs méthodes d'observation et de calcul. La comparaison était écrasante pour le Dépôt de la Guerre de France, et j'en fus si profondément frappé, que je résolus dès lors de consacrer ma vie à la régénération du Service géodésique de notre armée, si tristement tombé en défaillance.

II.

Triangulation de la Corse.

En 1863, le Dépôt de la Guerre ayant décidé de substituer à l'ancienne Carte topographique de la Corse une Carte nouvelle établie sur les mêmes bases que la Carte de France de l'état-major, je fus envoyé en Corse et chargé de trianguler et de niveler la partie de l'île comprise entre le cap Corse et le mont Rotondo.

Ce morceau de triangulation comprend trente-quatre stations principales et deux cents points secondaires.

J'ai publié le compte rendu de nos opérations dans le Ier Supplément au Tome X du *Mémorial du Dépôt de la Guerre* (*voir* aussi *Comptes rendus des séances de l'Académie des Sciences*, 1er juin 1874).

Une base de Tranchot, dont les deux extrémités ont été retrouvées intactes, a servi de base de départ pour le calcul des triangles; l'origine zéro des altitudes a été prise au niveau moyen de la mer à Bastia; enfin, j'ai rattaché l'île à la triangulation française en calculant une chaîne de cent triangles choisis, partant du côté Granier-Colombier du parallèle moyen serpentant le long des Alpes, longeant les contours du golfe de Gênes, s'appuyant sur l'île de Capraja et l'île d'Elbe et aboutissant, en Corse, au côté Asto-Stello de notre triangulation. Nous avons ainsi obtenu une vérification de la longueur de la base de Tranchot, suffisante pour les besoins d'une Carte topographique, en même temps que la longitude, la latitude et un azimut pour le calcul des coordonnées géographiques.

Nos observations de Corse ont prouvé de la manière la moins équivoque que les altitudes attribuées jusqu'ici aux principales sommités de

l'île devaient recevoir de fortes corrections. Ainsi, pour ne citer qu'un exemple intéressant, le point culminant de l'île n'est pas le mont Rotondo, comme on le croit généralement, mais bien le mont Cinto, qui atteint une hauteur de 2710^{m} (85^{m} de plus que le mont Rotondo).

III.

Mesure et calcul de la longueur d'un arc de parallèle terrestre de 9° 36′ d'amplitude en Algérie.

(Tome X du Mémorial du Dépôt de la Guerre. — Comptes rendus, séance du 21 juillet 1879.)

Les opérations géodésiques entreprises en Algérie par l'état-major, avaient naturellement pour objet, au point de vue pratique, la construction d'une Carte de notre colonie; mais elles devaient aussi servir à une étude plus approfondie de la figure et des dimensions du globe terrestre.

A ce point de vue, plus spécialement scientifique, la triangulation algérienne est appelée à jouer un grand rôle. En premier lieu, elle offre à la science géodésique la mesure complète d'un arc de parallèle terrestre qui embrasse dès aujourd'hui une amplitude voisine de 10°, et jusqu'à présent on n'a fait concourir à l'étude de la Terre que des arcs de méridien, les procédés de l'ancienne Géodésie ne permettant pas de mesurer avec une précision suffisante les amplitudes célestes des arcs de parallèle.

En second lieu, notre triangulation est destinée, dans un avenir prochain, à servir comme de base et de contrôle au vaste réseau qui couvre l'Europe. Elle doit ce remarquable privilège à cette circonstance que, d'un côté, elle a pu récemment être rattachée avec les triangles espagnols et, de l'autre côté, pourra bientôt l'être avec les triangles italiens, servant ainsi de fermeture à cette immense ceinture de triangles qui entourent la Méditerranée en la franchissant deux fois pour unir l'Afrique avec l'Europe, l'Algérie avec la France.

Notre chaîne s'étend de l'est à l'ouest, entre les frontières du Maroc et celles de la Tunisie, et s'écarte peu d'un arc de parallèle; elle comprend quatre-vingt-huit triangles et s'appuie sur trois bases. Une station astronomique centrale, à Alger, fournit les éléments de départ pour le calcul des positions géographiques. Ces positions sont vérifiées par l'observation directe de la longitude, de la latitude et d'un azimut en deux points extrêmes, à Bone et à Nemours.

La différence de longitude entre ces deux stations donne l'amplitude astronomique de l'arc de parallèle algérien. Mais nous ne nous sommes pas borné à cette simple opération : afin de mieux contrôler nos résultats et nos méthodes, et aussi dans un but purement scientifique, nous avons mesuré les trois différences de longitude des trois stations, Bone, Alger et Nemours. Cette dernière opération accomplie, nous avons pu calculer la longueur des deux segments et de l'arc total du parallèle algérien et faire aussi concourir nos travaux géodésiques à l'étude scientifique de la figure de la Terre.

a. **Chaîne primordiale de la triangulation algérienne (segment occidental).**

(Voir deuxième Partie du Tome X du Mémorial du Dépôt de la Guerre. — Rapport de M. Faye à l'Académie des Sciences, séance du 11 novembre 1872.)

C'est en 1864 que j'ai entrepris, en Algérie, la mesure d'une chaîne géodésique partant de la base de Blidah et qui devait continuer vers l'ouest la chaîne déjà mesurée vers l'est par le capitaine Versigny.

Six années passées sous la tente dans des régions malsaines ou peu accessibles ont été consacrées à ce travail, qui comprend la mesure des angles et des hauteurs pour trente-cinq stations du premier ordre entre Alger et la frontière du Maroc.

L'insurrection des Arabes en 1864, le typhus et le choléra en 1866, la famine en 1867 et 1868, nous ont fait souvent courir les plus grands dangers. Deux de nos camarades, les capitaines Vialla et Bondiverme, sont morts, l'un de la fièvre, l'autre d'une insolation, contractées dans les marais de la Macta et sur les bords du lac de Miserghin.

Depuis Alger jusqu'à Oran, les angles et les hauteurs ont été mesurés à l'aide d'un cercle répétiteur de Gambey. La méthode de la répétition des angles et les instruments répétiteurs étaient encore en usage au Dépôt de la Guerre et m'étaient imposés par la tradition des ingénieurs géographes. C'est en 1867 seulement que l'autorisation m'a été donnée d'employer, par exception, un cercle réitérateur de Brunner, que j'avais fait construire à mes frais. Tous les angles horizontaux de la portion de chaîne comprise entre Oran et la frontière du Maroc ont été mesurés avec cet instrument, les distances zénithales étant toujours demandées à l'ancien cercle répétiteur, mais par voie de réitération.

Chaque angle a été obtenu, en général, par six séries de dix répétitions chacune ou par quarante réitérations correspondant à des origines équidi-

stantes sur le limbe; toutefois, dans quelques stations que des circonstances particulières, telles que la neige, les pluies, une tempête ou même la crainte d'une attaque à main armée nous ont forcés à quitter précipitamment, le nombre des observations a été nécessairement un peu moindre, mais toujours suffisant.

La précision de nos mesures est mise en évidence par les faibles erreurs de fermeture de nos triangles. En prenant la moyenne, en valeur absolue, des erreurs commises sur les trois angles de nos trente-cinq triangles, nous trouvons qu'elle est égale à 1",3, c'est-à-dire environ deux fois moindre que la moyenne analogue de la Triangulation française.

Les triangles ont été calculés par la méthode ordinaire de Legendre; toutefois, l'erreur de fermeture n'a pas été répartie également sur chacun des angles: nous avons préalablement recherché, d'après les règles du Calcul des probabilités, l'erreur moyenne ou le poids de chaque angle, et l'erreur a été ensuite répartie en raison inverse des poids.

Afin de vérifier les éléments linéaires de notre chaîne, nous avons mesuré une base à l'ouest, vers la frontière du Maroc, et, comme la chaîne orientale du capitaine Versigny appelait un contrôle semblable, nous avons aussi mesuré une deuxième base à l'est, vers la frontière de la Tunisie.

b. Mesure des bases algériennes.

(Première Partie du Tome X du Mémorial du Dépôt de la Guerre.)

Nos deux bases d'Algérie ont, comme la base centrale de Blidah et comme les bases de France, des longueurs voisines de 10^{km}. Malgré l'opinion accréditée parmi les géodésiens étrangers, nous pensons encore qu'il est préférable de mesurer des bases un peu longues, qui puissent être reliées avec la triangulation par un petit nombre de triangles, et d'éviter ainsi ces réseaux complexes qui sont nécessaires pour passer d'une base de 3^{km} ou 4^{km} seulement à un côté de 30^{km} ou 40^{km}.

Depuis longtemps le Dépôt de la Guerre n'avait plus à sa disposition les trois règles de Borda, qui semblent condamnées à ne plus sortir de l'Observatoire de Paris, et il avait fait l'acquisition d'un appareil que Porro avait construit pour la mesure de nos bases algériennes.

Cet appareil est formé de deux verges cuivre et acier, terminées par des languettes graduées et formant un thermomètre métallique. La lecture des languettes s'opère au moyen de microscopes délimitant les portées succes-

sives. A l'appareil est joint, comme mètre étalon, une deuxième règle, bimétallique aussi, semblable à la première et formée de métaux identiques.

C'est au Conservatoire des Arts et Métiers que nous avons effectué, en 1866, grâce à la bienveillante autorisation de M. le général Morin et de concert avec M. Tresca, la mesure des coefficients de dilatation et l'étalonnage des deux verges de notre étalon bimétallique. Les détails de nos opérations ont été publiés dans le Tome X du *Mémorial*.

Une fois en possession des longueurs et des coefficients de dilatation des verges de cet étalon, nous avons obtenu les longueurs des verges cuivre et acier de l'appareil des bases, en mesurant deux cents fois, en Algérie d'abord et à Paris ensuite, avant et après chaque mesure de base, alternativement avec ces verges en une seule portée et avec le mètre étalon en trois portées, une longueur de 3^m déterminée par les axes de deux microscopes scellés sur des dés en pierre.

La base de Bone comprend trois mille quatre cent quarante-six portées, celle d'Oran trois mille cent vingt-sept; elles ont été mesurées la première en 1866, la deuxième en 1867, et, dans la même saison, pendant les mois de septembre et d'octobre.

La mesure d'une base de 10^{km} est une des opérations les plus délicates et à la fois les plus difficiles qu'on puisse entreprendre, surtout en Algérie où la vue des observateurs risque toujours d'être compromise par l'usage trop prolongé du microscope en plein air. J'aurais voulu mesurer chacune de nos bases une deuxième fois; mais la santé de mes assistants, quelque vigoureux qu'ils fussent, a toujours été si ébranlée après la première opération, que j'ai dû renoncer à en exécuter une seconde.

Toutefois, afin de pouvoir calculer l'erreur probable d'une portée isolée sur le terrain résultant des erreurs de lecture des languettes et des autres erreurs accidentelles, nous avons remesuré l'un des segments de la base d'Oran, comprenant trois cent quatre-vingt-dix portées, et nous avons trouvé :

Par la première mesure...	$L = 1180^m,8215$
Par la deuxième mesure..............	$L = 1180^m,8250$
Différence...........	$0^m,0035$

De là nous avons conclu l'erreur probable totale du mesurage sur le terrain, et, en la combinant avec les erreurs systématiques d'étalonnage et de dilatation, nous avons calculé les erreurs probables totales :

$\pm 0^m,010$ pour la base de Bone dont la longueur est...	$10325^m,167$
$\pm 0^m,009$ pour la base d'Oran » ...	$9364^m,178$

L'erreur relative de nos bases algériennes est donc environ $\frac{1}{1000000}$ (un millionième).

Un pareil calcul n'a jamais été fait pour les bases de France.

Nos deux bases mesurées, nous les avons rattachées par un petit réseau de triangles bien conformés avec les côtés les plus voisins de la triangulation.

On peut, par le calcul de la triangulation, conclure la longueur de la base d'Oran de celle de Bone. C'est là précisément le moyen le plus délicat de vérification qu'on puisse appliquer à une grande opération géodésique. L'écart qui s'est révélé ainsi, et qui comprend l'effet accumulé de toutes les erreurs commises dans une longue suite de quatre-vingt-huit triangles, est de $0^m,42$ seulement.

c. Nivellement géodésique.

Le nivellement de notre chaîne a été exécuté au moyen de distances zénithales réciproques, observées aux heures de la journée où la réfraction est minima. Le point de départ des altitudes, en Algérie, est le niveau moyen de la mer dans le port d'Alger.

En partant d'Alger, nous avons obtenu par le calcul ordinaire, pour l'altitude de la boule du fort Santa-Cruz, à Oran, $386^m,65$; par un nivellement géométrique exécuté à petites portées entre le zéro du port d'Oran et la même boule, les officiers du génie ont trouvé $386^m,89$.

La différence entre la mesure directe et la hauteur calculée est de $0^m,24$ seulement.

Ce résultat mérite d'être remarqué, surtout si l'on tient compte des difficultés que nous avons eu à surmonter en Algérie, où les réfractions subissent des variations excessives d'une heure à l'autre dans la même journée.

De l'ensemble de nos observations de distances zénithales conjuguées, il résulte que le coefficient de la réfraction en Algérie est resté toujours compris entre 0,06 et 0,10; la moyenne des cinquante-six valeurs que nous avons obtenues est égale à 0,072 : c'est le coefficient moyen actuellement employé dans le calcul des différences de niveau des points topographiques.

d. Station astronomique d'Alger.

(*Voir* le premier fascicule du Tome XI du Mémorial du Dépôt de la Guerre.)

La triangulation primordiale de l'Algérie était terminée en 1869 dans la région du Tell; mais, pour lui assigner sa véritable place sur le sphéroïde terrestre, il était nécessaire de mesurer la latitude, la longitude et un azimut en une station centrale appelée ainsi à fournir, comme Paris pour la France, les trois éléments de départ du calcul des positions géographiques.

La ville d'Alger, située à peu près à égale distance du Maroc et de la Tunisie, reliée avec les principaux centres de la colonie par des fils aériens et récemment avec Marseille par un câble sous-marin, était naturellement désignée pour devenir la station centrale de l'Algérie. Après une reconnaissance minutieuse des environs, au printemps de 1874, je fixai le lieu de cette station sur un plateau boisé qui domine les collines de Mustapha, non loin de la colonne Voirol, et j'y fis construire aussitôt un pavillon permanent d'Astronomie géodésique, pour en faire le centre de toutes nos opérations ultérieures.

Longitude. — La même année, sur la proposition de Le Verrier, il fut décidé que l'Observatoire de Paris et le Dépôt de la Guerre procéderaient en commun à la détermination télégraphique de la différence de longitude entre Paris et Alger, et, comme l'existence du câble sous-marin compliquait l'opération de difficultés dont il était impossible *a priori* de prévoir l'importance, on pensa qu'il était nécessaire de déterminer en même temps les différences de longitude entre Paris-Marseille et Alger-Marseille, de manière à former un triangle dont la fermeture serait une garantie de l'exactitude de nos résultats.

Rien ne fut négligé pour assurer le succès de cette triple opération, dans laquelle, pour la première fois, des observateurs, tous français, allaient appliquer l'enregistrement électrique à l'observation des passages et à l'échange des signaux.

Dans la mesure de la différence de longitude entre Alger et Paris, j'occupais la station de Paris et M. Lœwy celle d'Alger. Cette opération se distingue des deux autres, Paris-Marseille et Marseille-Alger, exécutées par MM. Lœwy et Stephan, en ce sens que les signaux échangés entre Paris et Alger avaient à franchir la distance énorme de 1789^{km}, en partie dans l'air, entre Paris et Marseille, avec le fil aérien, en partie dans la mer avec le câble sous-marin.

Les résultats que nous avons obtenus avec M. Lœwy, déjà communiqués à l'Académie dans la séance du 4 février 1878, ont été récemment publiés dans le premier fascicule du Tome XI du *Mémorial du Dépôt de la Guerre*.

Nous avons trouvé pour la longitude de la station d'Alger, rapportée au méridien de Paris, $2^m 50^s,374$.

MM. Lœwy et Stephan ont obtenu, par la double opération Marseille-Alger et Alger Paris, $2^m 50^s,356$.

La concordance de ces deux résultats est très remarquable, puisque l'écart est moindre qu'un centième de seconde de temps. [autour de la]

Latitude. — J'ai observé, pendant douze belles soirées, les distances zénithales méridiennes de quarante-six étoiles voisines du zénith et culminant de part et d'autre à moins de 25° de distance. Les erreurs systématiques provenant de l'instrument et de l'observateur s'éliminent par la combinaison de séries conjuguées faites dans les deux positions du cercle, pour des origines équidistantes sur le limbe; quant aux erreurs accidentelles, elles sont atténuées autant que possible par un grand nombre d'observations.

J'ai obtenu quatre cent dix-neuf valeurs de la latitude.

Il n'y avait pas à craindre, sur le plateau de Voirol, avec un pilier scellé dans le roc, loin de tout centre habité, les inconvénients inhérents aux observatoires des grandes villes, tels que trépidations du sol et réfractions anormales, et, pour cette raison, nous n'hésitons pas à penser que la latitude d'Alger est aussi bien déterminée que celle d'un grand observatoire.

J'ai adopté pour la latitude d'Alger la valeur $L = 36°45'2'',7$, dont l'erreur probable est réduite à moins d'un dixième de seconde, en admettant toutefois que les déclinaisons de nos étoiles sont parfaitement exactes.

Azimut fondamental. — Sur un mamelon élevé de l'Atlas, à 31600^m vers le sud et très près du méridien de la station, j'ai fait construire sur le roc un pilier maçonné portant à sa face supérieure un cylindre de repère, et j'ai déterminé l'azimut de ce repère à deux époques différentes, en 1874 et 1878:

1° En 1874, vers la fin et après la clôture des opérations de longitude. Un miroir solaire était placé au centre du pilier, et tous les soirs, avant le coucher du Soleil, on pointait un grand nombre de fois, dans les deux positions du cercle, le miroir et la croisée des fils de la mire méridienne nord. Les observations astronomiques étaient ensuite reprises et permettaient de calculer l'azimut de la miro nord, d'où l'on pouvait conclure l'azimut du miroir de l'Atlas.

2° En 1878, pendant les observations relatives à la longitude Géryville-Alger. Sur le pilier de l'Atlas était installé, centre pour centre, non plus un miroir, mais un collimateur optique, fournissant la nuit une belle image fixe et d'intensité uniforme, sur laquelle je pointais comme sur une mire ordinaire, dans le cours des observations méridiennes. L'azimut de notre repère était ainsi obtenu directement, sans passer par l'azimut intermédiaire d'une autre mire.

Les deux méthodes ont conduit à des résultats presque identiques. J'ai trouvé :

En 1874..... $\alpha = -3^s,859 \pm 0^s,008$ (onze soirées, trente-sept valeurs)
En 1878..... $\alpha = -3^s,853 \pm 0^s,009$ (dix soirées, trente-quatre valeurs)

et j'ai adopté pour la valeur définitive la moyenne

$$\alpha = -3^s,856,$$

dont l'erreur probable ne dépasse pas quelques millièmes de seconde de temps ou un demi-dixième de seconde d'arc.

La station d'Alger a été d'une importance exceptionnelle pour le développement du Service géodésique du Dépôt de la Guerre. Elle m'a offert l'occasion, si ardemment recherchée, de reléguer dans nos galeries les cercles astronomiques, qui remontaient aux premières années du siècle, et de doter le Dépôt de la Guerre d'un matériel astronomique entièrement nouveau. C'est ainsi que nous avons acquis des cercles méridiens de Brunner, des pendules et des chronographes de Breguet. Bientôt après, ces instruments et appareils étaient installés à Montsouris, dans un pavillon astronomique que j'ai fait construire sur les terrains concédés par la Ville de Paris pour l'Observatoire du Bureau des Longitudes. Sous ma direction, plusieurs jeunes officiers se livraient à l'étude et à l'usage des instruments, et surtout à la pratique des observations de passage, rendue si facile et si sûre par l'enregistrement électrique, et le Dépôt de la Guerre pouvait l'année suivante entreprendre, d'après un plan arrêté à l'avance, soit en France, soit en Algérie, les opérations d'Astronomie géodésique qui devaient compléter si utilement ses travaux de triangulation.

e. Amplitude astronomique de l'arc de parallèle algérien (stations de Bone et de Nemours).

Les deux stations de Bone et de Nemours sont situées à peu près à égale distance d'Alger et vers les deux extrémités de l'arc de parallèle algérien.

A chacune d'elles, j'ai mesuré la latitude et l'azimut d'une mire lointaine.

Quant aux longitudes, elles ont été l'objet de trois séries d'opérations, indépendantes l'une de l'autre, que nous avons exécutées en commun avec le capitaine Bassot et dans l'ordre suivant :

1° Longitude Bone-Alger ;
2° Longitude Alger-Nemours ;
3° Longitude Bone-Nemours.

Ces trois opérations distinctes ont été encadrées entre trois groupes de mesures de l'équation personnelle des deux observateurs, effectuées à des époques différentes, au commencement, vers le milieu et à la fin des opérations concordantes.

Pour chacune des trois longitudes, nous avons calculé, à chaque soirée, l'erreur moyenne et le poids, en prenant pour unité le poids d'une observation méridienne aux quatorze fils, dont l'erreur moyenne accidentelle a été trouvée égale à $\pm 0^s,042$.

Il existe entre les valeurs de chacune de nos trois longitudes, pour les soirées successives, un accord remarquable qui prouve qu'en étudiant, comme nous l'avons fait, l'influence de chaque cause d'erreur, en opérant par retournements fréquents du cercle et observant un grand nombre d'étoiles, on doit toujours obtenir sur le terrain des déterminations concordantes et d'une haute précision.

Dans l'opération dont il s'agit, la fermeture de notre triangle de longitude est encore plus satisfaisante que celle du triangle Paris-Marseille-Alger : l'erreur de fermeture est réduite à onze millièmes ($0^s,011$) de seconde de temps. En répartissant cette erreur en raison inverse des poids, nous avons obtenu pour les *amplitudes astronomiques des arcs de parallèle* compris entre

Bone et Alger........	$18^m,51^s,386 \pm 0^s,006$
Alger et Nemours.........	$19^m,34^s,947 \pm 0^s,006$
Bone et Nemours..........	$38^m,26^s,333 \pm 0^s,007$

f. **Calcul des positions géographiques.**

Avant d'effectuer le calcul des positions géographiques, il nous a paru essentiel de faire disparaître la discordance des bases en la répartissant de la manière la plus avantageuse sur tous les angles et les côtés de la chaîne, d'après les règles du Calcul des probabilités. Ce calcul de compensation n'a jamais été exécuté pour les bases du réseau français ; on sait que

Delambre a obtenu la concordance des bases de Melun et de Perpignan en appliquant aux angles de la méridienne des corrections arbitraires.

A cet effet, nous avons appliqué à chacun de nos angles les corrections dont Laplace a donné l'expression analytique dans le IIe supplément à sa *Théorie des probabilités*.

Les corrections des angles ainsi obtenues, nous avons calculé de nouveau les deux chaînes de triangles et nous avons retrouvé identiquement, par le calcul, les longueurs des bases mesurées. La chaîne parallèle de l'Algérie est ainsi parfaitement compensée.

J'ai effectué ensuite le calcul des positions géographiques, à l'aide des formules connues, en partant des coordonnées de la station d'Alger et adoptant les valeurs de Clarke pour le demi-grand axe et l'aplatissement du sphéroïde terrestre.

Ce calcul même nous offre le moyen de soumettre notre chaîne à une nouvelle et dernière vérification, par la comparaison des coordonnées calculées avec les coordonnées directes, pour notre station de Nemours. En désignant par L_g, $\mathcal{L}_g$, Z_g; L_a, $\mathcal{L}_a$, Z_a les latitudes, longitudes et azimuts géodésiques et astronomiques, nous avons obtenu, à la station de Nemours :

$$L_g - L_a = - \;\; 4'',7,$$
$$\mathcal{L}_g - \mathcal{L}_a = - 11'',1,$$
$$Z_g - Z_a = + \;\; 7'',6.$$

Les écarts sont, comme on le voit, assez élevés; mais, si on leur applique le théorème de M. Villarceau, qui établit une relation entre les effets des attractions locales sur les longitudes et les azimuts, nous trouvons que l'équation de condition est satisfaite à 1″ près, résultat qui semble consacrer le haut degré de précision de nos opérations en Algérie.

g. Longueur de l'arc de parallèle algérien.

La simple inspection de la Carte de nos triangles algériens montre qu'ils s'écartent peu du parallèle de 36°. Si, en outre, on prend la moyenne des latitudes des quatre-vingt-huit sommets de la chaîne, on obtient une valeur peu différente de 36°. Il était donc tout naturel de choisir cet arc de parallèle pour en calculer la longueur.

La méthode que nous avons adoptée consiste à considérer chacun des éléments de la courbe cherchée comme un petit arc de parallèle d'une sphère

dont la surface s'approche le plus qu'il est possible de celle du sphéroïde terrestre, dans toute l'étendue de la ligne à rectifier, et à calculer successivement les portions de parallèle interceptées entre les méridiens des extrémités des côtés qui relient entre elles, par une ligne brisée continue, nos trois stations astronomiques de Bône, Alger et Nemours. Les sommes de ces portions d'arc représentent le développement de l'arc total et de ses deux segments.

Afin d'obtenir une double vérification, j'ai effectué tous les calculs, d'abord à l'aide des côtés situés au nord de la chaîne, puis à l'aide des côtés situés au sud, et enfin à l'aide des côtés intérieurs.

Nous donnons ci-après les résultats de nos calculs.

Longueur d'un arc du parallèle de 36° entre

		Amplitude.
Bône et Alger.............	425234^m,7	4°42′50″,79
Alger et Nemours.........	441139^m,8	4°53′44″,20
Bône et Nemours..........	866374^m,5	9°36′ 4″,99

d'où il résulte, pour la longueur moyenne d'un arc de 1°, entre

Bône et Alger....................	90204^m,5
Alger et Nemours................	90109^m,4
Bône et Nemours..........	90156^m,0

Ce résultat final s'accorde, à 10^m près, avec la longueur calculée dans l'hypothèse de l'ellipsoïde de Clarke.

Il est difficile de préciser dès maintenant le rôle que jouera l'équation de condition qui en résulte, dans les calculs relatifs au sphéroïde terrestre.

Nous nous bornerons actuellement à signaler les différences qui se révèlent entre les longueurs de l'arc de 1° dans les parties orientale et occidentale de l'arc algérien. Ces différences ne sauraient provenir ni des erreurs commises dans la triangulation ou dans la détermination des éléments initiaux du calcul, latitude et azimut, à Alger, ni de l'incertitude de la valeur adoptée pour l'aplatissement; elles proviennent sûrement, pour la plus grande part, d'irrégularités très caractérisées de la surface terrestre dans la région considérée, manifestées d'ailleurs, pour notre station de Nemours, par la comparaison des coordonnées géodésique et astronomique que nous avons présentée à la page précédente.

IV.

Méridienne de France.

On sait depuis longtemps que la célèbre triangulation par laquelle nos devanciers ont rattaché Dunkerque avec Barcelone, et qui a servi de base d'abord au système métrique et plus tard à la Carte de France, présente certains défauts, qui, sans compromettre en rien le but qu'on voulait atteindre vers la fin du siècle dernier, devaient pourtant rendre l'œuvre de Delambre et Méchain impropre à concourir, avec les mesures récentes faites à l'étranger, à l'étude de la figure de la Terre.

C'est là le sort de toute œuvre scientifique de grande étendue d'avoir besoin d'une révision de siècle en siècle pour être tenue au courant de la Science, toujours progressive. Personne ne s'y méprendra; notre révision ne touche en rien aux bases du système métrique : l'unité fondamentale des poids et mesures, une fois fixée, ne saurait plus changer dans la suite des temps.

Les erreurs de la méridienne de France, signalées d'abord par les ingénieurs géographes, ont été mises en évidence, dans ces dernières années, par les observations astronomiques faites en divers points de la chaîne, notamment à Rodez, Carcassonne, Saligny-le-Vif, par M. Villarceau; mais, malgré les efforts des géographes et des astronomes, elles n'ont pas pu être localisées dans des régions définies et semblent affecter la chaîne tout entière.

Il m'a paru que le mieux était de reprendre toute la chaîne, en employant des instruments perfectionnés et les méthodes d'observation nouvelles. Cette grande entreprise, qui touche à sa fin, a excité plusieurs fois l'attention de l'Académie, qui a été tenue au courant des résultats successifs (*voir* le Rapport de M. Élie de Beaumont, séance du 16 mars 1874), et nous pensons qu'il est utile de rappeler les progrès réalisés.

On sait que la méthode de la répétition, dont nos illustres devanciers ont fait un si grand usage, a été postérieurement condamnée; j'ai introduit dans la pratique de la Géodésie française, d'une manière définitive, la méthode de la réitération, à laquelle on ne peut pas faire les mêmes objections.

Une des sources les plus habituelles d'erreur en Géodésie, c'est la fré-

quente obligation où l'on se trouvait d'utiliser les signaux naturels, tels que les clochers, et d'observer par suite les angles en dehors du centre. De là la nécessité, en chaque station, de recueillir sur place les éléments d'un calcul de réduction pour chaque angle. J'ai pris le parti de supprimer en bloc toutes ces causes d'erreur en construisant les signaux de toutes pièces et en centrant les repères sur le pied même de l'instrument de mesure, ou réciproquement.

Les anciens signaux présentaient des phases d'éclairement variant avec la position du Soleil et n'étaient pas toujours nettement visibles : nouvelles sources d'erreur que j'ai éliminées en adoptant les signaux héliotropiques de Gauss. Mais l'appareil que j'ai fait construire dans ce but, et présenté à l'Académie en 1872, est plus simple et plus commode que celui de l'illustre géomètre. Les géodésiens étrangers l'ont déjà adopté; ils ont adopté aussi pour la plupart le cercle azimutal réitérateur de Brunner.

Le premier instrument de ce genre, mentionné plus haut, et dont j'ai fait usage en Algérie à partir de 1867, dû aussi à MM. Brunner, a été décrit dans le Tome X du *Mémorial du Dépôt de la Guerre*, ainsi que la méthode de la réitération, substituée désormais à celle de la répétition.

Mais c'était là un instrument insuffisant pour les besoins de la Géodésie de haute précision. Je l'ai fait compléter en y ajoutant deux perfectionnements caractéristiques, qui en font comme un instrument parfait.

En premier lieu, l'éclairage des divisions se fait au moyen de prismes qui réfléchissent la lumière zénithale vers les microscopes dans une direction constante; on n'a pas à craindre ainsi un éclairement variable des traits de la graduation dans les diverses positions de l'alidade, et l'instrument se prête à la fois également bien aux observations du jour et à celles de la nuit. Une seule source de lumière fixe est suffisante dans les deux cas : pendant le jour, la lumière diffuse du zénith transmise à travers une glace horizontale en verre dépoli, et, pendant la nuit, une lampe pourvue d'un abat-jour en porcelaine blanche. Dans ce dernier cas, le champ du réticule est illuminé par un petit miroir plan placé au devant de l'objectif. En second lieu, j'ai fait adapter au réticule un fil mobile semblable à ceux qu'emploient les astronomes, et, grâce à cette disposition toute nouvelle en Géodésie, dont M. Villarceau m'avait conseillé l'essai, l'observateur peut multiplier les pointés pour une seule lecture du limbe et réduire ainsi considérablement l'erreur de visée, qui est la plus redoutable dans les observations géodésiques. L'instrument, il est vrai, est privé de lunette de repère, mais cette lunette est inutile, à cause de l'indépendance absolue du limbe

avec l'alidade, à la condition toutefois de l'installer sur un pilier maçonné invariable, ou, dans le cas de hautes charpentes, d'éliminer par la méthode l'effet de la torsion du support.

Ajoutons que, pour mieux éliminer encore les erreurs de pointé, j'ai introduit de nouveau les observations de nuit dans la pratique de la Géodésie française; on peut ainsi agrandir la durée des intervalles où les opérations sont praticables avec succès et gagner un temps précieux.

Pour la production des signaux de nuit, j'ai renoncé à l'usage des réverbères et j'emploie des collimateurs optiques du modèle Mangin, dont l'objectif a $0^{m},20$ de diamètre et $0^{m},60$ de distance focale; au foyer même est concentrée, au moyen d'un système optique convergent, la lumière d'une lampe à pétrole à mèche plate. L'objectif illuminé devient ainsi un véritable signal visible, par les temps favorables et à l'œil nu, jusqu'à des distances de 70^{km}, sous la forme de disques à contours bien limités, offrant une bissection facile et sûre.

Les observations de nuit, recommandées par Laplace pour la mesure du parallèle de Paris, avaient été depuis longtemps abandonnées, comme étant impropres à fournir les éléments d'un bon nivellement géodésique, lorsque MM. Élie de Beaumont, Fizeau et Villarceau m'en conseillèrent l'usage en 1874.

Les comparaisons que j'ai exécutées pendant la campagne de 1875, en dix stations de la méridienne, ont prouvé de la manière la plus évidente que les observations de nuit, appliquées seulement aux directions azimutales, possèdent un degré de précision supérieur à celui des observations de jour et qu'elles satisfont mieux aux conditions géométriques de la triangulation.

Au point de vue astronomique, la réforme n'a pas été moins complète. Autrefois, on demandait ces observations délicates aux cercles et aux théodolites employés à la mesure des angles. Nous avons pour cela suivi l'exemple des astronomes et adopté des cercles méridiens, calqués sur ceux des grands observatoires fixes, mais de dimensions moindres. Chose remarquable, malgré cette réduction de dimensions, nos observations nous paraissent valoir celles qu'on fait dans les grands observatoires. L'heure, la latitude, la direction du méridien, en rase campagne, sont même parfois plus exactes, car on gagne plus avec de petits instruments, grâce à leur stabilité et à la faiblesse de leurs flexions, que l'on ne perd sous le rapport de la puissance optique.

Enfin, nos devanciers n'avaient, pour déterminer les longitudes, qu'une

méthode bien imparfaite, celle des signaux lumineux produits par l'inflammation de quelques hectogrammes de poudre. Nous, nous avons l'électricité, qui a doté la Géodésie de ressources inespérées, dont nous nous sommes emparés pour le transport du temps et l'enregistrement des observations de passages.

Nous allons faire connaître rapidement les résultats que nous avons obtenus avec ces méthodes nouvelles et ces instruments nouveaux, en mettant à profit l'habileté de nos artistes et l'expérience acquise par nos contemporains.

La méridienne de France évoque de glorieux souvenirs, et l'on comprendra que nous ayons été séduit par la pensée de reprendre l'œuvre de Picard, de Cassini, de Delambre et Méchain, avec les moyens perfectionnés d'observation et de calcul que la Science possède aujourd'hui.

Les opérations, commencées en 1870, bientôt interrompues par la guerre et reprises en 1871, ont été continuées sans interruption depuis cette époque; elles sont actuellement terminées entre la base de Perpignan et les environs de la base de Melun, sur une amplitude de 6°30′ et comprennent déjà quarante-huit stations.

Deux de ces stations, Forceral et le Canigou, forment le côté commun avec la nouvelle triangulation espagnole.

Plusieurs stations de Corabœuf et même de Méchain ont été retrouvées, avec leurs repères intacts; la comparaison de nos résultats avec ceux de Corabœuf, pour la longueur des côtés qui nous sont communs, conduit à une identité presque absolue. Quelques désaccords se révèlent avec les résultats de Méchain, mais assez faibles cependant pour pouvoir en conclure que les fortes erreurs de l'ancienne méridienne ne doivent pas exister entre Rodez et Perpignan.

Au delà de Rodez, nous n'avons retrouvé qu'un repère de Delambre. Notre triangulation a pu dès lors s'épanouir en toute liberté, abandonnant les sommets mal choisis pour se porter sur les points les plus favorables.

Dans ce long parcours, nous avons retrouvé les piliers méridiens des stations astronomiques de M. Villarceau, à Carcassonne, à Rodez et à Saligny-le-Vif, et nous en avons fait des centres de stations géodésiques.

Le Puy-de-Dôme, qui appartient à la fois, comme sommet géodésique, à notre méridienne et à l'ancien parallèle moyen, est devenu un centre de station astronomique où j'ai déterminé la latitude, la longitude et un azimut, et vérifié l'existence d'une forte attraction locale qui dépasse 7″ en latitude.

La région ondulée et boisée comprise entre Bourges et la base de Melun

a présenté des difficultés considérables. Delambre et Delcros l'avaient évitée en la contournant, le premier par l'ouest et le second par l'est. Nous l'avons abordée de front, en nous établissant, non plus comme eux dans des clochers irréguliers et branlants, mais en pleine campagne, et nous élevant au-dessus du sol, pour éviter les rayons rasants, jusqu'à 25^m ou 30^m de hauteur, au moyen de pylones formés de deux fortes charpentes indépendantes.

Nous avons eu alors à nous prémunir, pendant les observations, contre l'action du vent et contre la torsion de la charpente intérieure qui supporte l'instrument; à cet effet, cette charpente a été mise à l'abri des rayons solaires et préservée du rayonnement nocturne, au moyen d'un coffrage qui recouvre la charpente extérieure, et nous avons observé de préférence la nuit, deux ou trois heures après le coucher du soleil. L'effet de la torsion est à peine sensible dans un petit intervalle de temps et peut être éliminé sûrement en opérant de droite à gauche d'abord, puis de gauche à droite, c'est-à-dire exécutant pour chaque point du tour d'horizon une double opération dans un sens d'abord, puis dans un sens contraire, pour revenir à la direction initiale, et rapprochant autant que possible les pointés faits au fil mobile sur les deux images.

Enfin, dans cette portion de la méridienne, nous ne nous sommes pas contenté d'observer des directions supplémentaires. C'est une chaîne double qui se vérifie ainsi elle-même de proche en proche.

Après neuf années d'observation, nous avons atteint les environs de la base de Melun, que déjà nos triangles entourent de toutes parts.

La fermeture des triangles peut donner une indication précieuse sur le degré d'exactitude de nos mesures. Nous trouvons, pour l'erreur calculée de la somme des trois angles d'un triangle, des valeurs tantôt positives, tantôt négatives, dont la plus élevée atteint 1",2 et dont la moyenne en valeur absolue est de 0",53 seulement. C'est là un degré de précision qui ne pourra guère être dépassé dans les opérations géodésiques.

Un autre moyen de contrôle nous est offert par la comparaison, aux deux stations de Rodez et du Puy-de-Dôme, des coordonnées astronomiques obtenues par l'observation directe et par le calcul en partant de la station de Carcassonne. En appliquant à la station de Rodez et à notre station du Puy-de-Dôme le théorème relatif aux attractions locales, nous trouvons que l'équation de condition est satisfaite :

Pour la station de Rodez, après onze triangles, à 1",65 près;

Pour la station du Puy-de-Dôme, après vingt-sept triangles, à 2",31 près.

V.

Stations astronomiques en France et en Algérie.

Depuis que le Dépôt de la Guerre a abordé les opérations de Géodésie astronomique, des observations ont été faites en plusieurs stations d'Algérie, de France et même en Tunisie, pour la détermination directe des latitudes, longitudes et azimuts terrestres.

La discussion des erreurs systématiques et accidentelles nous a conduit à établir les règles suivantes :

Pour la latitude, il n'est pas nécessaire de multiplier outre mesure le nombre des soirées d'observation ; il suffit d'observer quarante étoiles choisies pendant quatre soirées conjuguées deux à deux, pour deux calages équidistants dans les deux positions directe et inverse du cercle, pour obtenir la latitude à moins de $\frac{1}{10}$ près de seconde d'arc, sous la réserve exprimée plus haut.

Pour la longitude, six soirées sont suffisantes, si elles comprennent, aux deux stations conjuguées, avec deux échanges de signaux, quatre circompolaires et une cinquantaine d'étoiles horaires réparties dans quatre séries correspondant à quatre positions successives du cercle ; l'erreur probable de la longitude cherchée est alors réduite à environ $\frac{1}{100}$ de seconde de temps.

Enfin, nous avons trouvé que l'erreur moyenne d'une détermination isolée de l'azimut d'une mire lointaine invariable, résultant de l'observation d'une circompolaire et de trois séries de dix pointés sur la mire, était comprise entre $0^s,07$ et $0^s,09$. Il suffit donc d'obtenir quarante fois la valeur de cet azimut, pour que l'erreur probable du résultat définitif soit réduite à $\frac{1}{10}$ de seconde d'arc.

Les trois coordonnées de nos stations astronomiques sont ainsi déterminées avec le même degré de précision.

Sur le terrain, nous nous sommes astreints à réaliser systématiquement les conditions suivantes :

Chacune de nos stations astronomiques est aussi le lieu d'une station géodésique et comprend la mesure d'une latitude, d'une longitude et d'un azimut ; nous évitons ainsi tous éléments et tous calculs de réduction.

Tous nos cercles méridiens peuvent être considérés comme identiques; nos observations sont ainsi comparables entre elles.

Enfin, à chaque station nous installons deux mires méridiennes, dont l'une est une mire ordinaire; l'autre, située du côté opposé, à une très grande distance, est formée par un de nos collimateurs optiques, dont l'objectif, illuminé par une lampe focale, constitue une mire nocturne, invariable de position. Nous obtenons ainsi la véritable valeur de la collimation horizontale, indépendante des petits dérangements du cercle en azimut pendant les retournements, et nous mesurons directement l'azimut d'une mire lointaine par les mêmes observations qui nous donnent l'heure locale.

Le réseau astronomique de l'Algérie comprend huit stations, où j'ai mesuré personnellement la latitude et un azimut, et, en collaboration avec MM. les capitaines Bassot et Defforges, les différences de longitude avec Alger.

Après la station fondamentale d'Alger et les stations de Bone et de Nemours, trois autres stations ont été choisies en Algérie, à

Biskra,
Géryville,
Laghouat,

qui sont les trois postes avancés de notre occupation militaire. Celle de Biskra, à l'est, est située à l'extrémité de la petite chaîne méridienne de M. Roudaire; celle de Géryville, à l'ouest, est l'une des trois têtes de ligne qu'offre l'Algérie aux explorateurs du continent africain; enfin, celle de Laghouat est la station australe de la méridienne de France. De ce côté, sans doute, on n'ira jamais plus loin, car le désert semble offrir une barrière infranchissable à toute triangulation scientifique.

Mais il n'en est pas de même du parallèle d'Alger. Nous le prolongerons bientôt, à travers la Tunisie, jusque sur les hauteurs de Carthage. J'ai pu choisir, cette année même, les sommets des futurs triangles, et déjà, en 1878, S. A. le bey de Tunis m'avait autorisé à faire une station astronomique à Carthage. C'est là, sur l'emplacement même de la vieille cité punique, que nous souderons nos triangles de Tunisie avec les triangles italiens, qui viennent, par la Sicile et les îles intermédiaires, toucher l'Afrique.

Je cite pour mémoire la station d'Oran, où j'avais mesuré, en 1869, la latitude et un azimut, ainsi que la longitude, par la méthode des culminations lunaires, et je réserve la station de M'Sabiha pour en parler plus loin.

Des opérations semblables ont été exécutées en France. Sans parler des latitudes et des azimuts, nous avons déjà déterminé, avec le capitaine Bassot, les différences de longitude entre :

Paris (Montsouris) et le Puy-de-Dôme,
Paris (Montsouris) et l'Observatoire de Lyon,
Puy-de Dôme et l'Observatoire de Lyon,

et, en collaboration avec M. Stephan, la différence de longitude entre

l'Observatoire de Marseille et l'Observatoire de Lyon,

pour fermer le triangle des longitudes Paris-Lyon-Marseille.

La station de Lyon, qui assigne au nouvel Observatoire de cette ville sa véritable position géographique, fait partie d'une operation importante que nous avons exécutée, de concert avec MM. les astronomes suisses Hirsch et Plantamour, pour relier les stations suisses avec les stations françaises, en mesurant les différences de longitude des quatre sommets du quadrilatère fermé Paris, Lyon, Genève et Neuchâtel.

Comme on le voit, nos stations françaises ne sont pas seulement rattachées en longitude avec Paris : elles sont encore reliées entre elles et forment ainsi des triangles ou des polygones de longitudes qui se soudent les uns aux autres, et dans chacun desquels la petitesse de l'erreur de fermeture apporte une vérification précieuse des résultats obtenus.

Les opérations de longitude en Algérie nous ont permis de calculer la vitesse de transmission des signaux produits par l'électricité des piles le long des conducteurs aériens des lignes télégraphiques.

Les valeurs que nous avons obtenues ne sauraient être considérées comme mesurant la vitesse de propagation de l'onde électrique, mais elles représentent très exactement la vitesse avec laquelle un signal électrique se transmet à distance et s'enregistre dans nos appareils chronographiques. Nous avons ainsi trouvé, pour la vitesse de transmission d'un signal, des valeurs comprises entre 48 000^{km} et 34 000^{km} par seconde, et la moyenne des sept valeurs que nous ont fournies les stations algériennes est très voisine de 40 000^{km}, ce qui montre qu'un signal électrique pourrait revenir à son point de départ, après avoir fait le tour de la Terre, en une seconde de temps environ.

VI.

Jonction géodésique et astronomique de l'Algérie avec l'Espagne.

(Voir les Comptes rendus, séances du 24 novembre et du 1er décembre 1879.)

La possibilité de relier l'Algérie avec l'Espagne par-dessus la Méditerranée avait été entrevue comme un rêve, il y a soixante et onze années, par Biot et Arago; plus tard, en 1863, le colonel Levret avait prouvé, par le calcul, que la trajectoire des rayons visuels allant d'Algérie en Espagne, des cimes de l'Atlas aux sierras de Grenade et de Murcie, n'est pas interceptée par la courbure de la Terre, et que la jonction des deux pays est possible, malgré l'énorme distance qui les sépare.

Mais, entre les résultats de ces calculs et le point de fait, il y avait lieu de craindre qu'il n'y eût place pour l'impossibilité. La reconnaissance que j'ai exécutée sur le terrain même, en 1868, est venue donner à cet égard une certitude complète.

Dans un Mémoire lu à l'Académie le 18 novembre 1872, j'ai fait connaître les résultats de cette reconnaissance.

Les crêtes des sierras espagnoles sont visibles à l'œil nu, par les temps favorables, de tous les points géodésiques du premier ordre compris entre Oran et la frontière du Maroc; en recoupant les sommités principales de ces crêtes dentelées, j'ai constaté que deux d'entre elles, dont la forme est très caractérisée, restaient toujours visibles, et pouvaient ainsi fournir une base d'appui pour passer d'Espagne en Algérie au moyen de triangles gigantesques, dépassant en longueur tous ceux qui ont été tentés jusqu'ici. J'ai même indiqué les noms des sommets des triangles possibles, calculé les longueurs approchées des côtés, et proposé dès lors, pour obtenir des signaux perceptibles à des distances voisines de 300^{km}, d'avoir recours à l'emploi de la lumière solaire pendant le jour et de la lumière électrique pendant la nuit.

C'est en 1873 seulement, à la suite d'une entente préalable entre les Gouvernements espagnol et français, que nous avons été chargés, M. le général Ibañez et moi, de prendre les mesures nécessaires pour exécuter les observations définitives entre l'Espagne et l'Algérie.

Parmi tous les sommets posssibles, nous avons choisi : en Espagne, le Mulhacen, point culminant de la sierra Nevada, à l'altitude de 3550^{m}, et le

Tetica dans la province de Murcie, à 2080^m d'altitude; en Algérie, le Filhaoussen, point culminants de Traras, entre Tlemcen et Nemours, et le M'Sabiha, près d'Oran, respectivement situés à 1137^m et 585^m au-dessus du niveau de la mer. Ces quatre points forment un magnifique quadrilatère dont les quatre sommets sont réciproquement visibles entre eux.

Comme le Mulhacen n'est accessible et habitable que pendant la période assez courte où il est débarrassé de ses neiges, et que les observations ne peuvent être pratiquées en Algérie que vers la fin de l'été, nous ne pouvions guère exécuter les observations définitives que pendant le mois de septembre. Afin de terminer nos opérations en une campagne, nous décidâmes, avec le général Ibañez, que les quatre stations seraient occupées simultanément: en Espagne, par des officiers espagnols; en Algérie, par des officiers français, choisis parmi les observateurs les plus habiles, pourvus d'instruments et d'appareils identiques, et observant d'après une méthode commune.

L'Institut géographique d'Espagne avait préalablement commandé à M. Brunner deux cercles azimutaux semblables aux nôtres.

Comme on n'avait jamais opéré à de pareilles distances, les procédés ordinaires employés jusqu'à ce jour pour la production des signaux pouvaient devenir insuffisants : la prudence exigeait de recourir à des appareils nouveaux. M. le général Ibañez voulut bien me laisser le soin de les choisir et de les faire construire à Paris.

Pour les signaux solaires, j'ai demandé à M. Breguet des héliotropes spéciaux, dont les glaces planes argentées ont 0^m,30 de côté.

Pour la production des signaux électriques, j'ai adopté un réflecteur spécialement construit pour nous, par le colonel Mangin, en verre argenté de 0^m,50 de diamètre et 0^m,60 de distance focale.

Les rayons des deux surfaces sphériques et concaves ont été calculés de manière à détruire l'aberration de sphéricité par réflexion sur la surface postérieure argentée au moyen de l'aberration de sphéricité par réfraction à travers la surface antérieure, et le miroir fonctionne comme la surface concave d'un miroir parabolique.

Si, au foyer de ce miroir, on place une source de lumière électrique d'une superficie comparable à celle d'un disque de 6^{mm} de diamètre, le faisceau réfléchi comprend un cône central de lumière blanche ayant 24' d'amplitude et une large couronne irisée; l'amplitude du faisceau de lumière blanche est donc suffisante pour qu'une petite erreur dans l'orientation de l'appareil n'empêche pas les rayons lumineux de parvenir à l'observateur vers lequel ils sont projetés.

Comme source de lumière électrique, afin d'obtenir la plus grande intensité possible, j'ai adopté la machine magnéto-électrique de Gramme, actionnée par un moteur à vapeur et faisant jaillir l'arc voltaïque entre les deux pôles d'une langue à régulateur de Serrin, au foyer même des appareils projecteurs.

Ces appareils une fois terminés, les officiers espagnols, MM. le colonel Barraquer et le major Lopez d'abord, M. le général Ibañez ensuite, sont venus à Paris pour étudier et recevoir ceux qui leur étaient destinés, et tous ensemble nous avons fait, dans les ateliers de M. Breguet et ceux de M. Sautter, des expériences photométriques de jour et de nuit, pour nous rendre compte de la puissance de nos appareils.

Les résultats ont dépassé toutes nos espérances : l'effet produit par nos appareils équivaut à celui de plusieurs milliers de becs Carcel.

Tout notre matériel ainsi préparé, pour le transporter aux quatre sommets du quadrilatère, il a fallu ouvrir des routes nouvelles, dans des régions escarpées et difficilement accessibles, et c'est à cette besogne qu'ont été employés, pendant plusieurs mois, en Algérie aussi bien qu'en Espagne, plusieurs centaines de soldats travailleurs. Il a fallu aussi aménager des sources pour assurer la provision d'eau des dépôts de charbon nécessaires au fonctionnement de la machine.

Toutes les opérations préparatoires étaient terminées, les quatre stations étaient prêtes le 20 août. Chacun de nous était à son poste : colonel Barraquer au Mulhacen, major Lopez à Tetica, capitaine Bassot à Filhaoussen ; j'occupais la station de M'Sabiha.

Le temps était beau, mais les vapeurs qui montaient de la Méditerranée ne se laissaient pas traverser par les faisceaux de rayons solaires dirigés sur nos instruments ; la nuit, les signaux électriques ne paraissaient pas davantage.

Disons tout de suite que les signaux solaires ont complètement échoué. Pas un seul n'a été vu, ni en Espagne ni en Algérie. Nous aurions éprouvé un échec complet et désastreux si nous n'avions pas eu recours à la lumière électrique.

Enfin, le 9 septembre, après vingt jours d'attente fiévreuse, j'apercevais la lumière électrique de Tetica, visible parfois à l'œil nu, comme un disque rougeâtre, de teinte uniforme, comparable comme éclat à l'étoile α du Bouvier qui se levait dans le voisinage au-dessus de l'horizon de la mer. Le 10, j'apercevais le feu électrique de Mulhacen ; nos collègues espagnols apercevaient en même temps nos signaux et nous entrions dans la période des ob-

servations définitives ; commencées le 9 septembre, elles étaient terminées le 1er octobre.

Le degré de précision de nos mesures est mis en évidence par la petitesse des erreurs des quatre triangles qui forment notre quadrilatère de jonction. Ces erreurs, susceptibles encore de corrections, toutefois fort légères, sont égales, en secondes d'arc, à

$$+0'',18, \quad -0'',54, \quad +1'',84, \quad +1'',12,$$

et ne dépassent pas, comme on le voit, les erreurs de ce genre qu'on rencontre dans les meilleures triangulations où les côtés ne dépassent pas 6 à 10 lieues.

Le problème de la jonction géodésique des deux continents est donc résolu, et la méridienne de France s'étend aujourd'hui sans interruption depuis les îles Shetland jusqu'au Sahara.

Nous ferons remarquer que nous avons personnellement contribué aux trois soudures de ce grand arc, entre la France et l'Angleterre d'abord, puis sur la chaîne des Pyrénées, enfin entre l'Espagne et l'Algérie.

Mais, ce premier résultat une fois atteint, notre tâche n'était pas terminée. Nous nous sommes proposé encore de projeter sur le ciel deux des points de notre réseau situés, l'un en Algérie, le M'Sabiha, et l'autre en Espagne, le Tetica.

Il s'agissait de mesurer en ces deux stations la latitude et un azimut, ainsi que les différences de longitude entre Alger et M'Sabiha, pour rattacher M'Sabiha avec Paris, et entre M'Sabiha et Tetica pour nous relier avec Madrid.

M. l'astronome Merino occupait la station de Tetica, le capitaine Bassot celle d'Alger. Je continuais à observer à M'Sabiha. Les trois observateurs étaient pourvus de cercles méridiens et d'appareils identiques, et à cette occasion nous avions prêté à l'Espagne notre cercle méridien de Brunner, n° 2, et l'un de nos chronographes.

La station de M'Sabiha étant reliée par un fil télégraphique avec celle d'Alger, la différence de longitude des deux stations a été obtenue par l'échange des heures locales au moyen de signaux télégraphiques, enregistrés sur les chronographes des deux stations.

Pour comparer entre elles les pendules de Tetica et de M'Sabiha, nous avons eu recours à l'échange réciproque, par-dessus la Méditerranée, de signaux électriques lumineux et rythmés, dont la transmission, même à 70 lieues, peut être considérée comme instantanée.

Dans ce cas, l'équation personnelle des deux observateurs est double; elle ne comprend pas seulement celle qui est relative à l'observation des astres, mais encore celle qui résulte de l'observation des phénomènes lumineux instantanés, et il a fallu déterminer avec soin chacune de ces équations.

A cet effet, M. Merino est venu à Paris pendant les mois de juin et de juillet; la première équation a été déterminée par la méthode ordinaire dans notre Pavillon des longitudes à Montsouris, et la seconde à l'Observatoire de Paris, de la manière suivante :

Un de nos collimateurs était placé sur la tour de Montlhéry, à 24km environ de distance, et dirigé sur la plate-forme de l'Observatoire. M. Merino et moi, nous observions séparément les signaux lumineux produits à Montlhéry, avec des lunettes identiques, et chaque signal observé venait s'enregistrer sur la bande d'un chronographe à trois plumes, dont l'une marquait l'heure de la pendule et les deux autres les instants du phénomène pour les deux observateurs. Nous observions ainsi quarante signaux; puis, pour renverser toutes les conditions de l'expérience et éliminer la parallaxe des plumes, nous changions de lunette et de tope, et nous procédions à une nouvelle série d'observations de quarante signaux. L'ensemble de ces deux séries nous donnait une valeur de l'équation personnelle relative aux signaux.

Nous avons ainsi observé pendant plus d'un mois plusieurs milliers de signaux.

Les expériences préliminaires nous ont montré que, comme l'avait indiqué M. Liais, l'observation des signaux rythmés est susceptible d'une très grande précision; mais elles ont aussi révélé des faits nouveaux qui contredisent certaines conclusions de ce savant astronome.

Ainsi l'équation personnelle n'est pas nulle dans l'observation des signaux rythmés; chaque observateur a la sienne propre. Elle est, il est vrai, moins variable dans le courant d'une même soirée et d'une soirée à l'autre que celle qui se manifeste dans l'observation des passages d'étoiles; mais elle peut, comme cette dernière, atteindre un ou plusieurs dixièmes de seconde; entre M. Merino et moi, elle s'élève à 0,124. Toutes les valeurs obtenues sont comprises entre 0,108 et 0,149, ce qui prouve combien les variations dues à l'état physiologique des observateurs ont eu pour nous peu d'importance.

En second lieu, il est préférable d'observer les éclipses instantanées et non pas les apparitions; dans nos expériences, nous pouvions indifférem-

ment observer les unes ou les autres; mais l'observation des éclipses est plus précise et plus sûre. Les physiologistes peuvent expliquer le fait: je l'attribue surtout à ce que, même avec des signaux rythmés, l'apparition d'un signal cause toujours une certaine surprise à l'observateur.

Enfin, le rythme qui convient le mieux consiste à espacer les éclipses de deux en deux secondes, les durées des éclipses et celles des apparitions du signal lumineux étant les mêmes et égales à une seconde de temps.

L'échange des signaux lumineux entre Tetica et M'Sabiha, à la distance de 270^{km}, ne pouvait s'effectuer sûrement que si le faisceau, bien dirigé et d'intensité constante, était susceptible d'être interrompu d'une manière instantanée. Pour réaliser ces deux dernières conditions, qui n'étaient pas nécessaires dans les mesures azimutales, j'ai employé nos collimateurs optiques ou réfracteurs à lentille, en substituant à la lampe à pétrole, qui nous sert dans les observations ordinaires, une lampe électrique, non plus du modèle de Serrin, où se produisent des déplacements oscillatoires du rayon positif et par suite des défaillances du faisceau éclairant, mais une lampe électrique à main susceptible d'un réglage continu, à l'aide duquel on peut maintenir exactement au même point le crayon positif, en conservant aux deux crayons la distance convenable; et, pour augmenter encore (dans le rapport de 2 à 3) l'intensité lumineuse, j'ai incliné les crayons à 30° sur l'axe, la pointe incandescente du crayon positif étant tournée vers l'objectif.

Ces petits appareils peuvent être réglés et orientés comme de véritables lunettes; ils sont plus faciles à manier que les réflecteurs et nous ont fourni des images plus homogènes, mieux limitées et presque aussi éclatantes, bien que les lentilles n'aient que $0^{m},20$ de diamètre.

J'estime à 500^{km} ou 600^{km} la distance à laquelle on pourrait les apercevoir, par des temps favorables, avec une lunette de 4 pouces.

Ils offrent aussi ce précieux avantage, que, l'image conjuguée du charbon positif venant se former au foyer de la lentille sous la forme d'un petit disque de $0^{m},006$ de diamètre, le faisceau lumineux peut être interrompu presque instantanément par un petit levier soumis à l'action intermittente d'un appareil électro-magnétique.

Les échanges de signaux s'opéraient comme il suit :

Tetica, par exemple, envoyait quarante signaux; à l'instant de chaque éclipse, le levier de l'obturateur fermait le courant de la pile locale et le phénomène était enregistré automatiquement sur le chronographe, comme un passage d'étoiles; M'Sabiha de son côté, observait les instants des

éclipses et, en pressant sur le bouton du tope, les enregistrait aussi comme un passage d'étoiles.

Puis M'Sabiha envoyait et enregistrait quarante signaux que Tetica recevait et enregistrait de même.

Le dernier signal était accompagné, de part et d'autre, d'un long contact pour repérer les secondes correspondantes des deux pendules.

Chaque échange complet comprenait quatre séries pareilles, soit en tout cent soixante signaux envoyés et cent soixante signaux reçus. Deux échanges par soirée donnaient lieu à l'enregistrement, de part et d'autre, de six cent quarante signaux, répartis en huit séries.

L'effet produit par l'apparition et la disparition rythmée du petit disque lumineux était saisissant, si bien que nous aurions pu, dans la plupart de nos soirées, observer à l'œil nu les éclipses. Toutefois, nous nous sommes toujours astreints à nous servir d'une lunette, pour ne pas modifier les conditions physiques dans lesquelles nous avions déterminé notre équation personnelle.

Du 5 octobre au 16 novembre, nous avons aperçu réciproquement nos signaux électriques pendant quinze soirées; sept d'entre elles seulement, également favorables à M'Sabiha et à Tetica, peuvent servir au calcul de la longitude, chacune comprenant, de part et d'autre, quatre circompolaires au moins, avec cinquante étoiles horaires réparties dans quatre positions successives du cercle, et l'échange de six cent quarante signaux.

La constance de la portion de l'équation personnelle relative aux signaux lumineux est extrêmement remarquable ; nous évaluons à moins d'un centième de seconde de temps seulement l'incertitude de la détermination ; d'où nous concluons que l'emploi des signaux lumineux rythmes pour le transport du temps, réservé à quelques cas intéressants, dans lesquels on ne peut disposer d'un fil télégraphique, est susceptible de donner des résultats d'une très haute précision.

C'est la première fois qu'une opération de ce genre a été réalisée. J'en ai conçu et préparé l'exécution dans tous ses détails ; elle a été couronnée d'un succès complet.

Nous avons ainsi fermé le vaste polygone des longitudes dont l'un des sommets est à Paris, et les autres à Marseille, à Alger, à M'Sabiha, Tetica et Madrid.

Ce polygone exceptionnel contient tous les cas possibles qui peuvent se produire dans la mesure des longitudes, puisqu'il comprend dans son périmètre des fils aériens, un câble sous-marin et, en guise de fil, une sorte

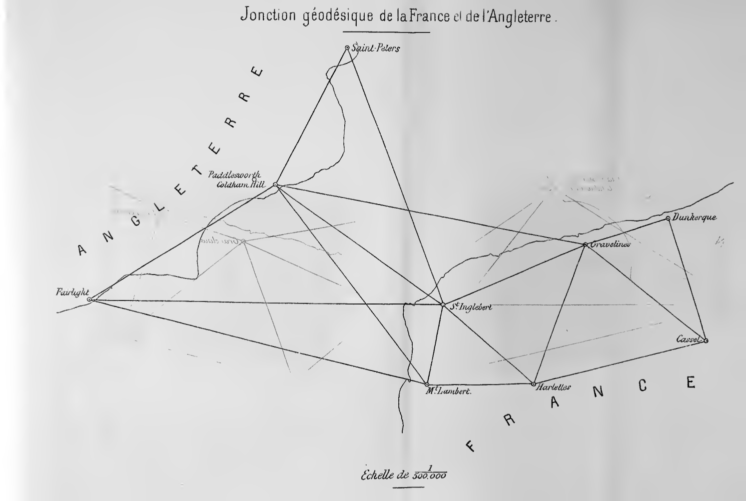
de traînée lumineuse qui unit M'Sabiha avec Tetica par-dessus la Méditerranée.

Je me bornerai à dire, en terminant, que j'ai exécuté, en France, en Afrique et dans plusieurs pays de l'Europe, des levés topographiques et des reconnaissances militaires qui embrassent de grandes étendues de territoire. Ces travaux, quoique appartenant au domaine de la Géographie, ont un caractère plutôt professionnel que scientifique. Plusieurs d'entre eux même, relatifs à l'étude des pays voisins, ne sauraient être publiés. Qu'il me soit permis cependant de signaler, puisqu'elle a été exécutée avec l'autorisation bienveillante du gouvernement tunisien, la reconnaissance, que j'ai dirigée l'hiver dernier, de toute la partie nord de la régence comprise entre Carthage, Bizerte et la frontière algérienne, sur une étendue de 240^{km}.

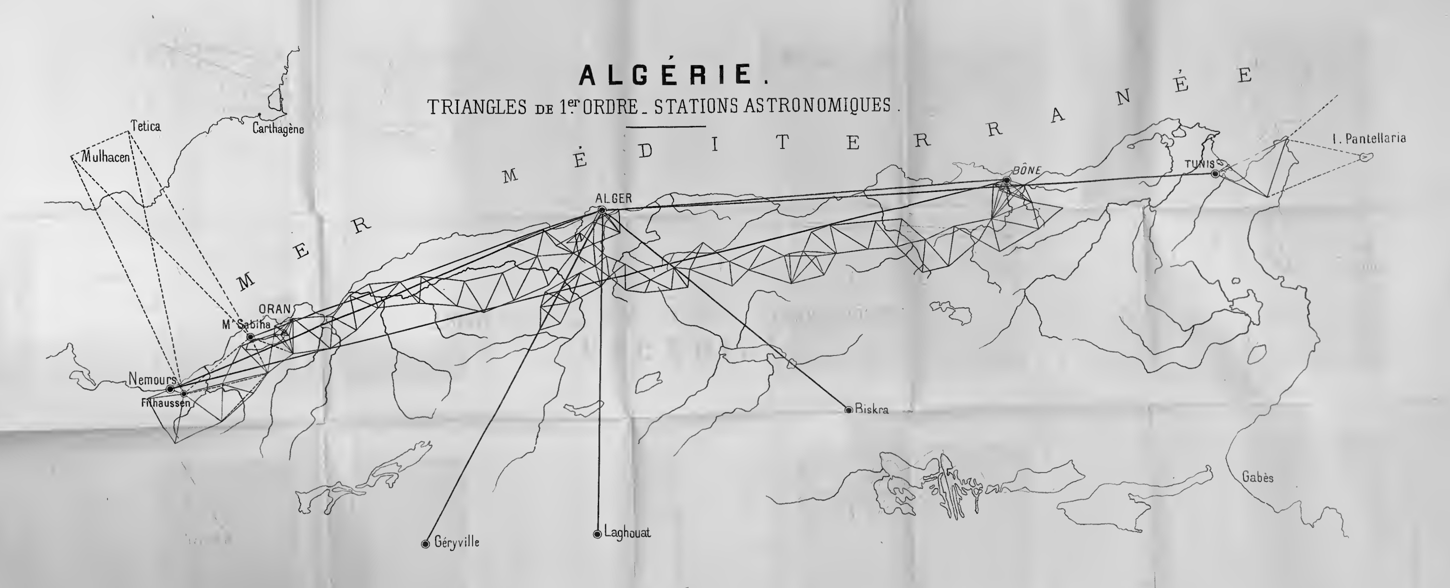
Dans l'exposé qui précède, je me suis contenté de résumer ceux de mes travaux, plus spécialement scientifiques, que les géomètres pourront utiliser pour la détermination de la figure et des dimensions du globe terrestre.

5824 PARIS — IMPRIMERIE DE GAUTHIER-VILLARS, QUAI DES AUGUSTINS, 55.

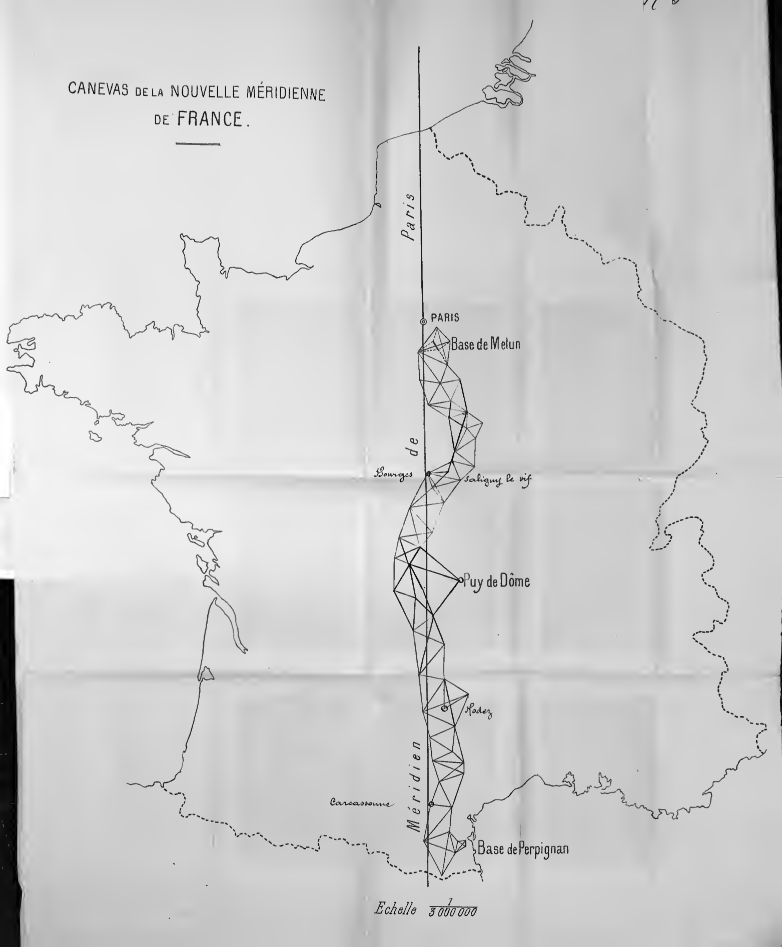
Jonction géodésique de la France et de l'Angleterre.



Échelle de $\frac{1}{500.000}$

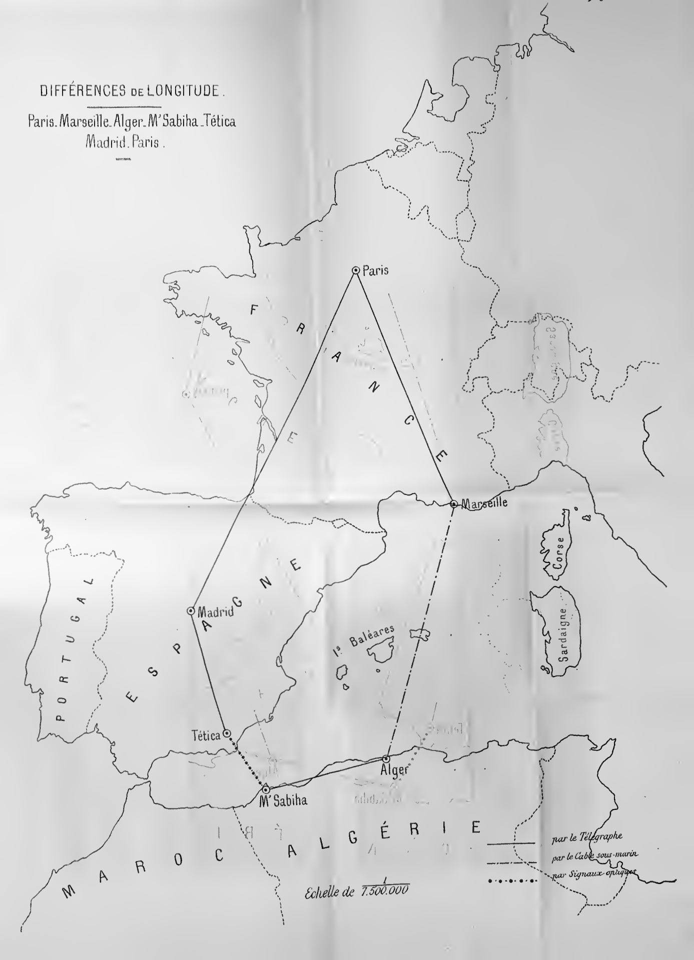


ALGÉRIE.
TRIANGLES DE 1er ORDRE _ STATIONS ASTRONOMIQUES.
MER MÉDITERRANÉE
Tetica
Mulhacen
Carthagène
ORAN
M'Sabiha
Nemours
Filhaussen
ALGER
BÔNE
TUNIS
I. Pantellaria
Biskra
Géryville
Laghouat
Gabès
Echelle 1/2400.000


CANEVAS DE LA NOUVELLE MÉRIDIENNE
DE FRANCE.
Méridien de Paris
PARIS
Base de Melun
Bourges
Saligny le vif
Puy de Dôme
Rodez
Carcassonne
Base de Perpignan
Echelle 1/3 000 000

Jonction géodésique de l'Espagne et de l'Algérie.




DIFFÉRENCES DE LONGITUDE.
Paris. Marseille. Alger. M'Sabiha. Tética
Madrid. Paris.
Paris
FRANCE
Marseille
Corse
Sardaigne
PORTUGAL
ESPAGNE
Madrid
Iˢ Baléares
Tética
Alger
M'Sabiha
MAROC
ALGÉRIE
par le Télégraphe
par le Cable sous-marin
par Signaux optiques
Echelle de 1/7.500.000